

УДК 629.423.31

Ю. Ф. Дубравін

**ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ТА АДЕКВАТНОСТІ
МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ
ЕЛЕКТРОВОЗА ЗМІННОГО СТРУМУ**

У статті розглядаються фактори, що впливають на точність та адекватність математичної моделі електровоза змінного струму з колекторними двигунами. Приведені вирази для визначення втрат та падіння напруги у підсистемах електропривода з урахуванням тривалості комутації вентилів, пульсації випрямленого струму в колі тягових двигунів та характеристик вентилів випрямної установки. Розглянута математична модель може бути використана при дослідженні факторів, що впливають на коефіцієнт корисної дії та коефіцієнт потужності, а також для розрахунку характеристик активного струму електровозів.

В статье рассматриваются факторы, которые влияют на точность и адекватность математической модели электровоза переменного тока с коллекторными двигателями. Приведены выражения для определения потерь и падения напряжения в подсистемах электропривода с учетом длительности коммутации вентилей, пульсации выпрямленного тока в цепи тяговых двигателей и характеристик вентилей выпрямительной установки. Рассмотренная математическая модель может быть использована при исследовании факторов, которые влияют на коэффициент полезного действия и коэффициент мощности, а также для расчета характеристик активного тока электровозов.

Factors which influence on exactness and adequacy of mathematical model of electric locomotive of alternating current with collector engines are examined in the article. Resulted expression for determination of losses and powerfailure in the subsystems of электропривода taking into account duration of commutation of valves, pulsation of the straightened current in the circle of hauling engines and descriptions of valves of rectifying installation. The considered mathematical model can be used for research of factors which influence on an output-input ratio and power-factor, and also for the calculation of descriptions of active current of electric locomotives.

Ключові слова: ЕРС змінного струму, тяговий трансформатор, випрямна установка, кут комутації, коефіцієнт корисної дії, коефіцієнт потужності, математична модель, моделювання.

© Дубравін Ю. Ф., 2013

Рішення задач оптимізації параметрів вузлів перетворювачів ЕРС та вибору раціональних режимів їх роботи пов'язане з оцінкою втрат електроенергії на тягу, визначенням коефіцієнта корисної дії (к.к.д.) та коефіцієнта потужності.

Існуючі методи дають можливість виконувати інженерні розрахунки та отримувати приблизну середньостатистичну оцінку витрат електроенергії. При цьому коефіцієнт ефективності випрямленого струму, що є функцією коефіцієнта пульсації струму, приймається як константа. Фіксоване значення має також коефіцієнт пульсації, який змінюється залежно від тягового струму. Не врахована також функціональна залежність падіння напруги на активному опорі обмотки трансформатора від тривалості комутації, що вносить неточності при визначенні випрямленої напруги перетворювача.

Суттєвий вплив на роботу і характеристики перетворювачів електровозів змінного струму з колекторними тяговими двигунами (ТЕД) має інтервал комутації, що характеризується кутом γ . Кут комутації вентилів перетворювачів, як відомо, є наслідком дії магнітних потоків розсіювання в обмотках тягового трансформатора (ТТ) та появи індуктивного опору x_a .

Індуктивний опір може бути визначений за допомогою реактивної складової напруги короткого замикання (КЗ), що приведена в паспортних даних ТТ у відсотках відносно номінальної напруги:

$$u_p = \frac{U_p}{U_{2н}} 100\%.$$

Реактивна складова напруги КЗ, виражена у вольтах:

$$U_p = x_a I_{2н}$$

де $I_{2н}$ — номінальний струм вторинної тягової обмотки ТТ.

В трансформаторі абсолютні значення активного і реактивного опорів первинної і вторинної обмоток зв'язані через квадрат коефіцієнта трансформації, тому приведений до вторинної обмотки активний опір:

$$r_m = \frac{r_1}{K_m^2} + r_2,$$

де K_m — коефіцієнт трансформації ТТ.

Приведений до вторинної обмотки реактивний опір обмоток трансформатора:

$$x_a = \frac{x_1}{K_T^2} + x_2$$

Залежність тривалості комутації діодів від реактивного опору обмоток:

$$\gamma_1 = \arccos \left(1 - \frac{2I_d X_a}{U_{2m}} \right),$$

де I_d — середній випрямлений струм.

Тривалість комутації керованих вентилів з урахуванням кута керування α :

$$\gamma_2 = \arccos \left(\cos \alpha - \frac{2I_d x_a}{U_{2m}} \right) - \alpha.$$

Комутаційні процеси приводять до збільшення фазового зсуву між струмом і напругою, що знижує коефіцієнт потужності випрямляча.

Зсув по фазі першої гармоніки струму відносно напруги в некерованих випрямлячах при умові, що комутація вентилів лінійна:

$$\varphi_1 = \frac{\gamma_1}{2}.$$

В керованих випрямлячах фазовий зсув додатково збільшується за рахунок кута керування:

$$\varphi_2 = \alpha + \frac{\gamma_2}{2}.$$

Коефіцієнт потужності при вказаному фазовому зсуві:

$$\chi = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cos(\varphi_2).$$

Індуктивність згладжуючих реакторів ЕРС $L_d \neq \infty$, тому випрямлений струм пульсуючий і складається із постійної складової I_d та змінної $i_d(t)$, що має подвійну частоту відносно частоти мережі. У міжкомутаційну частину півперіоду миттєве значення випрямленої напруги при $r_m = 0$ складається із суми напруг на індуктивному опорі і е.р.с. ТЕД

$$u_d = U_{2m} \sin \omega t - E_d + L_d \frac{di_d}{dt}, \quad (1)$$

де E_d – е.р.с. ТЕД;

L_d – індуктивність згладжуючого реактора.

Е.р.с. самоіндукції $L_d \frac{di_d}{dt}$ протидіє зміні струму, тому екстремуми кривої струму $i_d(t)$ в межах півперіоду випрямленої напруги мають місце при $\frac{di_d}{dt} = 0$, тобто при $u_d = E_d$ (моменти $\omega t_1, \omega t_2$ на рис. 1).

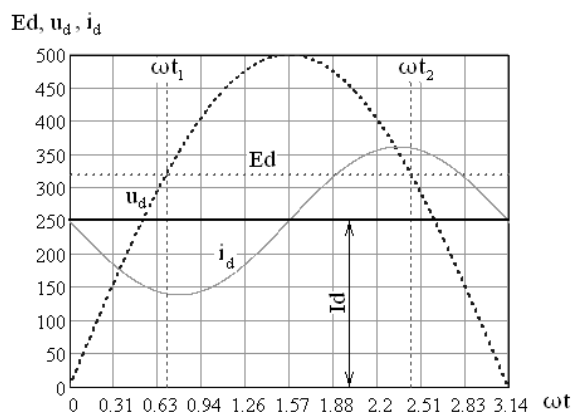


Рис. 1. Графіки випрямленої напруги та струму

Миттєве значення струму пульсації згідно з (1):

$$i_d(t) = \frac{1}{\omega L_d} \left[-U_{2m} \cos \omega t_2 - E_d \left(\omega t_2 - \frac{\pi}{2} \right) \right] + I_d.$$

Пульсуючий струм має мінімальне значення в момент ωt_1 при $u_d = E_d$, тобто, при $U_{2m} \sin \omega t = E_d$, звідки:

$$\omega t_1 = \arcsin \frac{E_d}{U_{2m}}$$

В момент $\omega t_2 = \pi - \arcsin \frac{E_d}{U_{2m}}$ пульсуючий струм має максимальне значення, отже амплітуда пульсуючого струму:

$$I_{dm} = \frac{1}{\omega L_d} \left[\left(-U_{2m} \cos \left(\pi - \arcsin \frac{E_d}{U_{2m}} \right) - E_d \left(\pi - \arcsin \frac{E_d}{U_{2m}} - \frac{\pi}{2} \right) \right) \right] + I_d.$$

Відносний коефіцієнт пульсації випрямленого струму являє собою відношення амплітуди пульсуючого струму до його середнього значення $K_{ns} = \frac{\Delta I_d}{I_d} = \frac{I_{dm} - I_d}{I_d}$.

Комутаційні процеси та пульсація струму суттєво впливають на рівень напруги в колі випрямленого струму. Зовнішня характеристика перетворювача, тобто залежність напруги, підведеної до ТЕД від їх навантаження:

$$U_d = U_{d0} - \Delta U_{\Sigma},$$

де $U_{d0} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_2$ – середня випрямлена напруга неробочого ходу некерованого випрямляча;

ΔU_{Σ} - сумарні втрати та падіння напруги в колі ТЕД.

У випадку керованого симетричного випрямляча зовнішня характеристика перетворювача:

$$U_{d\alpha} = U_{d0\alpha} - \Delta U_{\Sigma},$$

де $U_{d0\alpha} = U_{d0} \cos \alpha$ – середня випрямлена напруга неробочого ходу.

Випрямно-інверторні перетворювачі (ВІІ) сучасних вантажних електровозів забезпечують чотиризонне регулювання напруги на ТЕД. Вторинна обмотка кожного плеча ТТ, при цьому, складається із трьох секцій, з відношенням напруг 1:1:2, дві обмотки мають напругу по U_{21} , третя – $U_{22} = 2U_{21}$.

Завдяки подачі на окремі тиристори ВІІ керуючих імпульсів з постійною фазою α_0 , що відповідає мінімальному куту відкриття, створюються нульові контури розрядки енергії кола випрямленого струму. Середня випрямлена напруга неробочого ходу, при регулюванні в межах зон, визначається формулами:

$$\text{Зона 1} - U_{1d0\alpha} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} U_{21} (1 + \cos \alpha);$$

$$\text{Зона 2} - U_{2d0\alpha} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_{1d0\alpha} + \frac{\sqrt{2}}{\pi} U_{21} (1 + \cos \alpha) = \frac{\sqrt{2}}{\pi} U_{21} (3 + \cos \alpha);$$

$$\text{Зона 3} - U_{3d0\alpha} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} 2U_{21} + \frac{\sqrt{2}}{\pi} U_{21} (1 + \cos \alpha) = \frac{\sqrt{2}}{\pi} U_{21} (5 + \cos \alpha);$$

$$\text{Зона 4} - U_{4d0\alpha} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} 3U_{21} + \frac{\sqrt{2}}{\pi} U_{21} (1 + \cos \alpha) = \frac{\sqrt{2}}{\pi} U_{21} (7 + \cos \alpha).$$

Сумарні втрати та падіння напруги:

$$\Delta U_{\Sigma} = \Delta U_k + \Delta U_r + \Delta U_g + \Delta U_{zp},$$

де $\Delta U_k = \frac{2I_d x_a \xi}{\pi}$ – втрати випрямленої напруги за період комутації вентилів;

$\xi = 1 + 0,4K_{ne}$ – коефіцієнт, що враховує вплив пульсації струму;

ΔU_r – падіння напруги в приведеному активному опорі обмоток трансформатора;

ΔU_g – падіння напруги у вентилях випрямної установки (ВУ);

ΔU_{zp} – падіння напруги в згладжуючому реакторі.

Під час комутації вентилів відбувається короткочасне коротке замикання вторинної обмотки ТТ, а випрямлений струм замикається в обхід вторинної обмотки. При цьому падіння випрямленої напруги в активному опорі трансформатора буде меншим у порівнянні з тим же падінням у випадку миттєвої комутації ($\gamma=0$), коли б струм в обмотці ТТ і навантажені були однакові.

Середнє значення падіння напруги в обмотках ТТ в міжкомутаційному інтервалі $\gamma \dots \pi$

$$\Delta U_r = \frac{1}{\pi} K_{efz} \int_{\gamma}^{\pi} r_T I_d d\omega t = \left(1 - \frac{\gamma}{\pi}\right) r_T I_d K_{efz},$$

де $K_{efz} = (1 + 0,1\gamma) \sqrt{1 + 0,5K_{no}}$ – коефіцієнт ефективності змінного струму вторинної обмотки ТТ.

Падіння напруги у вентилях ВУ характеризується рівнянням прямої гілки апроксимованої вольт-амперної характеристики вентиля:

$$\Delta U_g = U_0 + r_0 I_g K_{efg} K_{efe},$$

де U_0 – порогова напруга вентиля;

r_0 – диференціальний опір вентиля;

I_g – середній за період струм вентиля;

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

$K_{\text{ефв}} = \sqrt{1 + 0,13K_{\text{до}}^2}$ – коефіцієнт ефективності випрямленого струму, що враховує збільшення падіння напруги в активному опорі в зв'язку з пульсацією випрямленого струму.

При послідовно-паралельному з'єднанні вентилів ВУ маємо:

$$\Delta U_{\text{е}} = 2(U_0 + r_d \frac{I_d}{2n_{\text{np}}}) n_{\text{nc}},$$

де n_{np} , n_{nc} – відповідно число паралельних та послідовних ланок вентилів у плечі ВУ.

Падіння напруги в згладжуючому реакторі:

$$\Delta U_{\text{зр}} = r_p I_d K_{\text{ефв}},$$

де r_p – активний опір обмотки згладжуючого реактора.

Сума втрат потужності в перетворювачі:

$$\Delta P = (1 - \frac{\gamma}{\pi}) r_T (I_d K_{\text{ефз}})^2 + \Delta U_{\text{е}} I_d + r_p (I_d K_{\text{ефв}})^2 + \Delta P_{\text{mp}},$$

де ΔP_{mp} – повні втрати потужності при напрузі контактної мережі 25 кВ.

К.к.д. перетворювача – відношення активної потужності на виході перетворювача до потужності, що споживається з мережі:

$$\eta = \frac{U_d I_d}{U_d I_d + \Delta P}$$

При відомій активній потужності, що передається первинною обмоткою ТТ у вторинну, можна визначити коефіцієнт потужності перетворювача із відношення активної потужності до повної потужності:

$$\chi = \frac{\Delta U_d I_d + \Delta P}{U_1 I_1}$$

де U_1, I_1 – діючі значення напруги та струму первинної обмотки ТТ, з урахуванням споживачів обмоток власних потреб.

Приведена математична модель тягового перетворювача, дає можливість моделювати складові втрат і падіння напруги в системах електропривода, досліджувати характер зміни втрат потужності при зміні навантаження, їх вплив на к.к.д. та коефіцієнт потужності електровоза.

Математична модель дає можливість підвищити точність розрахунку характеристик активного струму всіх серій електровозів змінного струму з колекторними ТЕД при виконанні тягових розрахунків.

ЛІТЕРАТУРА

1. Дубровский З. М., Попов В. И., Тушканов Б. А. Грузовые электровозы переменного тока: Справочник. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Транспорт, 1998. – 503 с.
2. Преобразовательная техника./ Руденко В. С., Сенько В. И., Чиженко И. М. – 2-е изд., перераб. и доп. – К.: Вища школа. Головное изд-во, 1983. – 431 с.
3. Тихменев Б. Н., Трахтман Л. М. Подвижной состав электрифицированных железных дорог. Теория работы электрооборудования. Электрические схемы и аппараты.: Учебник для вузов ж.-д. трансп. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Транспорт, 1980. – 471 с.
4. Электронная и ионная техника. / Засорин С. Н. и др.; Изд. 2-е. – М.: Транспорт, 1973. – 440 с.